arXiv:2603.02490v1 [physics.optics] 3 Mar 2026

与腔体布拉格反射镜单片集成的高应力 Si_3N_4 反射薄膜

Megha Khokhar, [1,2] Lucas Norder, [1] Paolo M. Sberna, [3,*] 和 Richard A. Norte[1,†]

[1] *Department of Precision and Microsystems Engineering, Delft University of Technology, Delft 2628 CD, The Netherlands* [2] *Kavli Institute of Nanoscience, Department of Quantum Nanoscience, Delft University of Technology, Delft 2628 CD, The Netherlands* [3] *Else Kooi Laboratory, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, Delft 2628 CD, The Netherlands*（日期：2026年3月4日）

高应力氮化硅（Si_3N_4）薄膜代表了腔光力学领域的先进水平，兼具超低耗散、光学透明性以及与晶圆级纳米加工的完全兼容性。然而，将其集成到高精细度光学腔中仍然困难，通常需要键合或对准敏感的组装方式，限制了可扩展性和长期稳定性。在此，我们提出一种单片晶圆级集成策略：将高应力 Si_3N_4 光子晶体薄膜直接悬空置于热兼容的 SiN/SiO_2 分布式布拉格反射器（DBR）上方；这种反射器能够耐受化学计量 Si_3N_4 生长所需的高温。无缺陷非晶硅牺牲层与无黏连等离子体掏蚀相结合，可形成亚微米间距的垂直耦合腔，并在释放后数秒内构成自对准谐振器。得益于固有的拉伸应力，悬空薄膜仅出现原子尺度的下垂，从而确保近乎理想的腔体平行度和长期稳定性。光学反射率测量表明，镜面之间存在纳米尺度间隙时，腔精细度超过 8×10^2。机械振铃衰减测量显示 $Q_{\mathrm{mech}} > 10^5$，表明 DBR集成保留了高应力 Si_3N_4的低耗散特性。这证明该集成工艺保留了材料卓越的耗散稀释特性，支持将其轻松扩展至文献中报道的高 Q 纳米机械架构。所得 Si_3N_4–DBR平台兼具光学与机械相干性、高制造良率和设计灵活性，可用于开发可扩展的光力学器件，服务于精密传感和量子光子学。

I. 引言

腔光力学利用谐振系统中光与机械运动之间的相互作用，已成为基础研究和精密传感技术的重要平台 [1, 2]。其最简单的形式是由一个光学腔构成，其中一面反射镜可移动。反射镜的运动会调制腔场，从而实现对位移和力的精密读出。利用高精细度光学腔将光限制在小体积内，可进一步放大这些效应，实现基态冷却 [3], 、量子压缩 [4], 、超灵敏力测量 [5] ，以及科学领域迄今最灵敏的位移检测之一 [6]。要实现这样的性能，需要极高的光学与机械相干性：光学腔必须保持高精细度，机械元件则必须具有极低的机械耗散和强光力耦合。为接近这些极限，可移动反射镜应兼具高光学质量（高反射率和低曲率）与低机械损耗；实际应用中，这意味着优先采用轻质、高应力薄膜，并对其进行设计，使其与支撑结构的耦合最小化。

在可用于此类反射镜的材料中，高-应力氮化硅（Si_3N_4）薄膜已成为室温光力学的最先进方案 [7]。其内置的大拉伸应力 [8], 、在电信波长下的超低光吸收（十亿分之一） [9], 以及晶圆级 CMOS 制造相结合，实现了卓越的光机械性能（Q_{mech}） [10–17]。因此，Si_3N_4 薄膜能够实现阿牛顿级力传感、芯片级惯性导航 [18], 、机械频率梳 [19], 以及室温量子态制备 [20]。其多功能性促成了多种纳米机械几何结构，包括：弦 [14, 15, 21–26], 、鼓膜 [10, 16, 27–29],、声子晶体（铂碳）谐振器 [11, 13, 17, 30, 31], 以及蹦床薄膜 [5, 12, 32, 33]。所有实例均表现出创纪录的低阻尼，并能与室温热机械噪声实现强隔离。

这一性能的关键因素之一，是形成化学计量比氮化硅所需的高温低压化学气相沉积（LPCVD），该氮化硅具有吉帕级拉伸应力和十亿分之几的光吸收 [9]。如此高的温度可实现化学计量比，从而抑制吸收，并使材料在千赫兹至兆赫兹弯曲频段的机械损耗角正切值达到纳米机械材料中最低之列。氮化硅谐振器在室温下已展现出最高的 Q_{mech}，而在低温下，其品质因数还会进一步提高 [34–38], ，这进一步巩固了

* p.m.sberna@tudelft.nl
† r.a.Norte@tudelft.nl

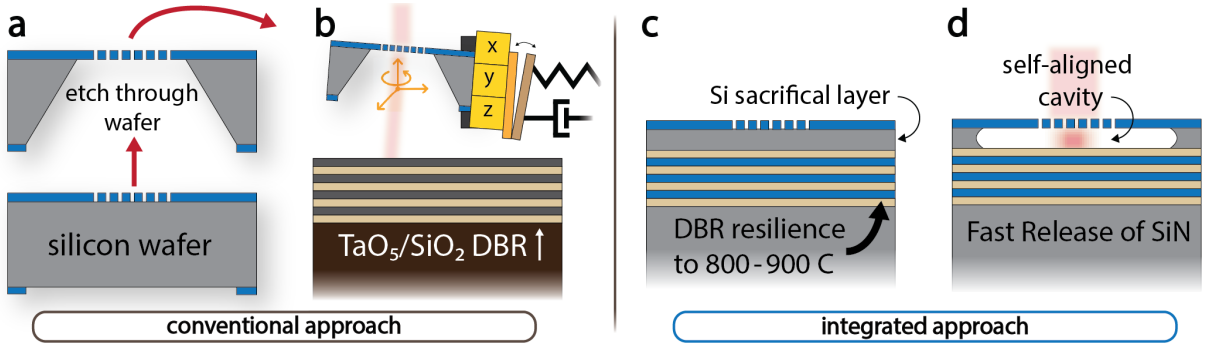

图 1. Si_3N_4 薄膜的传统制造方式与集成方案对比。(a) 为实现光学通路，Si_3N_4 薄膜的传统制造需要在芯片上进行深刻蚀，这些工艺复杂且精细，还会留下必须后续清除的残留物。(b) 需要复杂的对准基础设施，才能与传统分布式布拉格反射器对准并形成腔。(c) 集成方案在高温下于硅牺牲层和由 SiO_2 与 Si_3N_4 制成的分布式布拉格反射器上沉积高应力 Si_3N_4。只需对硅层进行数秒欠刻蚀，即可使悬空的高应力 Si_3N_4 光子晶体薄膜位于分布式布拉格反射器上方，形成具有高 Q_{mech} 的自对准单片式光机腔。

它们作为一种独特而强大的平台，在所有温度下均可用于量子和精密传感。

然而，如此极高的机械灵敏度要求读出所依赖的光学界面同样稳定。要在反射式 Si_3N_4 薄膜与传统反射镜之间实现亚纳米级对准，需要极高的机械精度和热稳定性，通常还必须配备大量对准基础设施 [39–46]。如图 1a–b 所示，现有实现方式通常依赖这样的制造方案：将 Si_3N_4 芯片完全刻蚀贯穿，以开出光学通路窗口 [47],，随后手动将薄膜与外部腔结构对准。这些传统方法精细而脆弱、耗时，且难以扩展或封装。

近期，研究人员探索了在分布式布拉格反射器（DBR）上方集成高性能纳米机械反射镜的方法，包括牺牲层沉积策略，正如 III–V 体系中的研究所示 [48]。然而，III–V 平台仍受限于晶圆尺寸较小、与 CMOS 不兼容，以及机械性能会随时间劣化等问题。将类似的集成方案扩展到 Si_3N_4，则从根本上受到材料不兼容性的限制：生长化学计量比、高应力 Si_3N_4 所需的高温（≈800–900 °C）超过了传统 Ta_2O_5/SiO_2 分布式布拉格反射器的热预算，导致薄膜劣化和分层。尝试将 Si_3N_4薄膜直接键合到反射镜上，既无法维持高 Q_{mech}[44, 49]，又仍需繁琐的对准。这些局限阻碍了可扩展单片式光机腔平台的实现，无法兼顾 Si_3N_4 薄膜卓越的光学和机械性能。人们长期以来一直追求超短腔长，因为它们能够以不同于较长自由空间腔的方式增强光机耦合 [46, 48]

在这项工作中，我们通过引入一种单片腔平台，克服了这些长期存在的挑战

该平台将一层悬空的高应力 Si_3N_4薄膜直接集成在耐热、低损耗的 LPCVD SiO_2/Si_3N_4 分布式布拉格反射器上。借助无缺陷的非晶硅牺牲层和无粘连干法等离子体欠刻蚀，我们实现了膜反射镜与分布式布拉格反射器之间亚微米级的腔隙。这些腔隙可实现纳米级精度的自对准，所构成的腔是迄今采用反射式 Si_3N_4 薄膜的最短自由空间光力学腔之一 [46, 48, 49]。这些悬空薄膜的拉伸应力约为 1 吉帕，其下垂仅为皮米量级，与原子半径相当，自然形成平行的光学界面，并实现较高的制造良率。这为构建紧凑、高相干性的 Si_3N_4 腔光力学系统提供了一条可扩展的途径，同时避免了传统膜居中系统中的对准与组装瓶颈。

II. 集成光机械腔的设计与光学优化

光学腔读出通过将机械柔顺的 Si_3N_4 PtC 膜与高反射率DBR垂直耦合来实现，从而形成紧凑的法布里–珀罗腔（图2a）。在这种结构中，悬空的 PtC 膜充当部分透射的顶部镜，而 DBR 则充当高反射率的底部镜；两者之间亚微米级的空气间隙构成光学腔。膜的微小位移会调制腔的共振频率，从而实现高灵敏度的干涉式读出。相应的光机械耦合强度 $G = \partial\omega_c/\partial x$ 会随着光学模体积减小而增大，因此更强的垂直限制和更小的腔隙可提升位移到频率的转换效率。

首先，设计分布式布拉格反射器（DBR）。DBR 沉积在整片晶圆上，并提供宽带反射带。我们采用交替排列的 SiO_2（$n_1 = 1.44$) 和

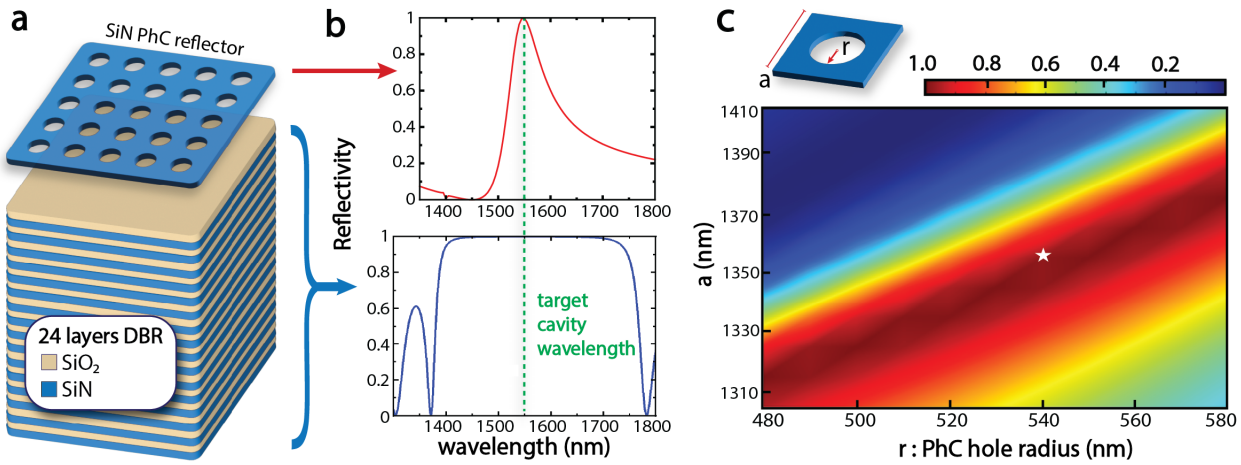

图2. 集成Si_3N_4–分布式布拉格反射器腔的设计与光学优化。(a) 腔结构示意图，显示高应力Si_3N_4 PtC 膜悬浮于24层Si_3N_4/SiO_2 分布式布拉格反射镜（分布式布拉格反射器）上方。(b) PtC 膜（红色）与分布式布拉格反射器（蓝色）的模拟反射率光谱，显示二者在1550 nm目标腔波长处重叠（绿色虚线）。(c) 铂碳随晶格常数 a 和孔半径 r变化的模拟反射率等高线图，标出用于制备的设计点（白色星号）。

以 1550 nm 为中心的 Si_3N_4 ($n_2 = 2.0$) 四分之一波长层。269 nm（SiO_2）和 194 nm（Si_3N_4）的厚度可产生相长光学干涉；对于总厚度为 ≈5.8 μm 的 24 层堆叠，模拟峰值反射率为 ≈ 99.91%。最顶层为 SiO_2，，可在 SF_6 释放步骤中提高选择性、降低表面粗糙度，并确保 DBR 在整个加工过程中保持光学洁净。图2b 显示了具有代表性的 DBR 光谱。

悬浮膜充当光刻可调谐光子镜：调节其铂碳几何结构，可精细控制其反射率以及其与DBR阻带重叠的波长。我们采用200 nm厚的高应力Si_3N_4 薄膜，以在反射率与机械耗散之间取得平衡（更薄的膜可改善 Q_{mech}，但会降低可实现的光学反射率）。

采用有限元仿真（COMSOL），通过扫描孔半径r和晶格常数 a，获得 PtC 在 1550 nm 设计点附近的反射率。所得反射率分布图（图2c）显示出一条窄的高反射率脊线，对应于相长的面外干涉。白色星号标记的几何结构在最大化反射率的同时，对光刻公差具有较强的稳健性。

由于 PtC 反射镜依赖面内周期性，因此天然具有偏振相关性，其反射率会随入射光束的发散程度而变化。较大、聚焦程度较低的光束会覆盖更多周期，面内 k分布也更窄，从而提高有效反射率。相比之下，分布式布拉格反射器仅具有垂直周期性，不受偏振影响，可提供均匀的宽带反射率。

为对组合腔进行建模，采用了严格耦合波分析（RCWA）。在此模拟中，纳入了实际的——际制造偏差（相对于标称值）。采用以下代表性参数可获得与模拟结果的良好吻合：a = 1.36μm、$r = 0.557$ μm、$t_{SiN} = 193$nm、$t_{SiO} = 271$ nm、$n_{SiN} = 2.09$、$n_{SiO} = 1.42$、腔间距 $t_{cav} \approx 0.95$ μm以及膜厚 $t_{PtC} = 191$ nm。LPCVD薄膜中自然会出现微小偏差，但由于DBR阻带较宽，且铂碳反射率峰脊的斜率平缓，这些偏差不会显著影响精细度。

总体而言，分布式布拉格反射器提供耐热的宽带反射镜，而可通过光刻调谐的 PtC 则能够与腔波长实现精确的光谱匹配。二者共同构成单片式自对准腔，具有强垂直限制，适用于高灵敏度光机械读出。垂直光机械耦合尤其适合氮化硅$_3N_4$，，因为其最高-Q 谐振器依赖由超薄膜厚度（≈200 nm）决定的面外弯曲模式；这种厚度易于通过沉积实现，却很难通过横向纳米光刻实现。

III. 采用干法加工技术实现可扩展纳米加工

为了实现适用于单片集成光机械腔的稳健晶圆级平台，我们开发了一种完全由干法加工步骤组成的制造流程（图 3a），并展示了每个阶段的俯视图和横截面视图。在制造过程中避免使用液体，可防止粘连和毛细力，从而确保高应力氮化硅$_3N_4$ 原有的光学和机械性能得以完整保留。

该工艺首先在硅晶圆上通过低压化学气相沉积沉积多层 Si_3N_4/SiO_2 分布式布拉格反射器。随

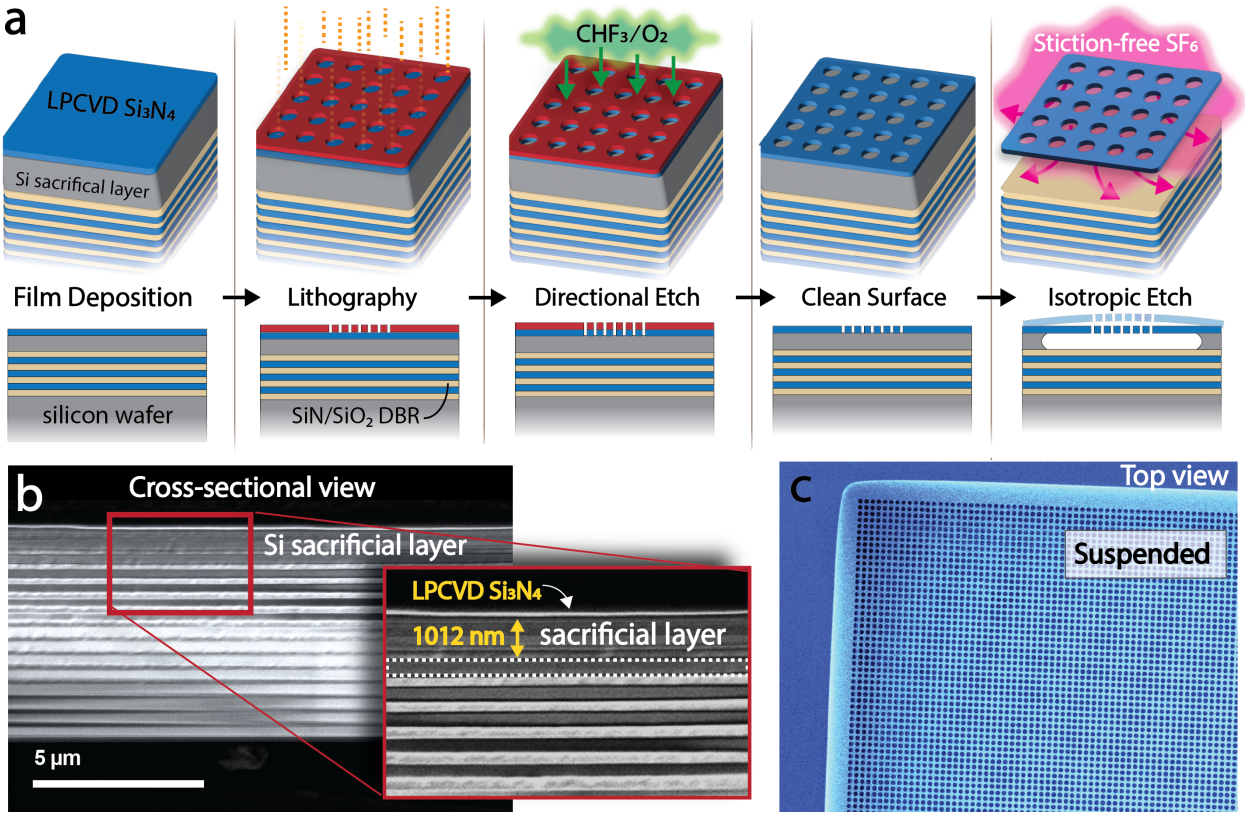

图 3. **高良率单片集成氮化硅$_3N_4$–DBR 光机械腔的制造**。(a) 各步骤的俯视图和侧视图示意制造流程：通过低压化学气相沉积生长 Si_3N_4/SiO_2 DBR 和非晶硅牺牲层；对 Si_3N_4 膜进行光刻图案化；定向 CHF_3/O_2 刻蚀；表面清洗；以及通过无粘连的各向同性 SF_6 欠刻蚀，使膜悬空。(b) 横截面扫描电子显微镜图像，显示释放前的 DBR叠层、非晶硅牺牲层和顶部 Si_3N_4 膜（插图：测得的牺牲层厚度为 ∼1012 nm）。白色虚线标出 DBR 的顶层 SiO_2 层。(c) 完全悬空膜的俯视光学显微图，展示了晶圆级均匀性和洁净释放。

着每一层都在高温下沉积，分布式布拉格反射器在后续加工过程中能够保持结构稳定性和清晰的界面。随后，通过电感耦合等离子体化学气相沉积（ICP-CVD）沉积 1012 nm 厚的非晶硅牺牲层，并调整工艺参数以抑制氢的掺入，防止后续高温低压化学气相沉积步骤中出现起泡或气泡。最后，沉积 200 nm 厚的化学计量比 Si_3N_4 层，以形成高应力薄膜，之后在薄膜上制备纳米孔以提高其反射率。完整的沉积工艺配方详见方法。

采用高分辨率电子束光刻定义膜图案。曝光和显影后，使用 CHF_3/O_2 电感耦合等离子体反应离子刻蚀（ICP-RIE）将方形晶格PtC孔转移到 Si_3N_4 层中，该工艺可形成各向异性轮廓和平滑的侧壁。随后用 N,N-二甲基甲酰胺去除残留光刻胶，再进行食人鱼溶液清洗以清除有机物，使膜表面在悬空前保持化学洁净。

悬浮通过短暂的各向同性实现 SF_6 等离子体底切可选择性地去除非晶硅层，同时使薄膜和分布式布拉格反射器相对不被刻蚀（图3a）。由于释放过程完全为干法，该工艺本质上无粘附，从而能够制造高深宽比的悬空纳米结构，并将塌陷或断裂降至最低 [14, 17, 50]。SF_6 底切可产生极为洁净的腔体界面、均匀的空气间隙，并在整片晶圆上具有高度可重复性 [51]。重要的是，这种干法释放方法已被反复证明能够制造出迄今机械损耗和光学损耗最低的一些纳米机械器件，且模拟与实测耗散高度吻合——这种性能难以通过氢氧化钾等液相刻蚀实现，后者可能需要数小时的穿晶圆刻蚀才能获得光学通路。相比之下，我们的腔可在数十秒内形成，并立即得到完全对准的Si_3N_4 薄膜–分布式布拉格反射器腔；这代表了将最先进薄膜材料与易于获得的光学读出系统进行集成的方式所发生的根本转变。

横截面扫描电子显微镜图像（图3b）显示了mul-

层分布式布拉格反射器、牺牲层，以及由低压化学气相沉积堆叠层形成的界面锐度。俯视图（图3c）显示了带有均匀PtC图案的完全悬空薄膜。≈1 GPa的残余拉应力使薄膜在操作和光学探测过程中保持张紧、平整且坚固，在毫米级跨度上仅有纳米级下垂 [52], ，从而在薄膜与分布式布拉格反射器之间形成腔体平行度，而这种平行度用传统对准方案难以复现，如图1b所示。

这些干法加工步骤共同提供了一条高良率、晶圆级的途径，用于制备具有稳健结构完整性的单片式薄膜–分布式布拉格反射器腔。我们现在表明，该平台所实现的不仅是机械上能够存活的薄膜：它还保持了优异的光学腔性能和低机械耗散。

IV. 光学腔共振的表征

为评估集成式Si_3N_4 薄膜–分布式布拉格反射器腔的光学性能，我们使用图4a所示装置进行了微反射率测量。可调谐二极管激光器（1530–1620 nm）依次经过准直器、偏振控制器和偏振器，再由高数值孔径物镜聚焦到薄膜上。反射光沿同一光路返回，并经由环形器送至光电二极管。白光照明光路与相机被集成到光束路径中，从而实现对被测薄膜的实时成像和精确对准。

为实现系统光学表征，芯片上包含一个阵列，其中有十六个 1×1 mm^2 悬空薄膜，PtC半径经过光刻调控，如图4b所示。无薄膜的参考区域（中心单元）可直接测量裸分布式布拉格反射器反射率。测量期间，利用相机图像（图4c）将红外探测光斑定位到悬空薄膜上，同时目视确认薄膜完整性，并避开边缘或缺陷。

图4d展示了两种不同PtC半径对应的代表性反射率光谱。每条光谱均呈现两个明显的凹谷。短波长特征（1535–1545 nm）对应垂直受限腔模，其位置会随孔半径变化而显著移动，反映出该模式对薄膜有效折射率的敏感性。相比之下，1555 nm附近的较长波长凹谷源自DBR叠层，对所有薄膜设计而言，其光谱位置均保持不变，这证实该特征由多层反射镜决定，而非由图案化的Si_3N_4薄膜决定。

形成于膜与分布式布拉格反射器之间垂直空气间隙中的腔模表现为短波长处的凹陷，并随孔半径变化而偏移（500 nm 与 510 nm）。这一偏移反映了随着空气填充率增加，膜的有效折射率发生变化。相比之下，分布式布拉格反射器模式由多层堆叠决定，在光谱上保持不变。

为确定这些共振的物理起源，我们对电场分布进行了有限元仿真（图4e–f）。在腔共振波长处，电场强烈局域于空气间隙内，形成一个垂直受限的法布里–珀罗模式，其驻波图样分布在高反射率DBR与PtC 膜之间。该模式的线宽很窄，测得半高全宽为 2.55 nm，对应的光学品质因数为 $Q_{\mathrm{opt}} \approx 604$ ，精细度为 ≈ 800。

较长波长处的特征对应于一种DBR模式，它产生于图案化膜散射的光获得非平面波矢之时。尽管裸DBR能强烈反射法向入射的平面波，但PtC 膜的邻近会引入横向散射，产生离轴分量和高阶k分量。这些分量能够穿透多层堆叠，并形成类似带边的光学模式，该模式主要局域于DBR内，仅通过微弱的倏逝耦合返回膜中。由于该共振由面内散射动力学而非垂直腔间距决定，因此随着孔半径变化，其光谱响应仍保持不变。因此，它在反射率谱中表现为一个较宽且对几何形状不敏感的特征（半高全宽 6.13 nm， $Q_{\mathrm{opt}} \approx 254$）。

最后，图4d展示了同一芯片上不同器件的光谱可调性：增大铂碳孔半径会使腔模发生蓝移，而DBR模式保持不变。这证实薄膜决定腔模位置，而分布式布拉格反射器提供稳定的宽带底部镜，不受光刻变化影响。

总体而言，实验与模拟结果共同证实，该集成平台可作为一个稳定、可调谐的高精细度腔。腔模强烈的面外局域使其非常适合干涉式位移传感，而薄膜模式与DBR模式的共存则为混合光子-光力学架构提供了可能。

V. 悬浮薄膜器件的机械共振表征与高Q值性能

在过去几年中，本文所用的各向同性SF_6 等离子体底切已成为Si_3N_4, 最强大的释放技术之一，使器件在标准硅衬底上的 Q_{mech}接近 10^9–10^{10} 。然而，将Si_3N_4 与多层分布式布拉格反射器集成——其中包含数十个界面、不同的声阻抗以及改变的边界条件——是否会引入机械损耗或降低耗散稀释，此前从未得到确立。因此，证明Q值得以保持至关重要，须先于这一集成平台

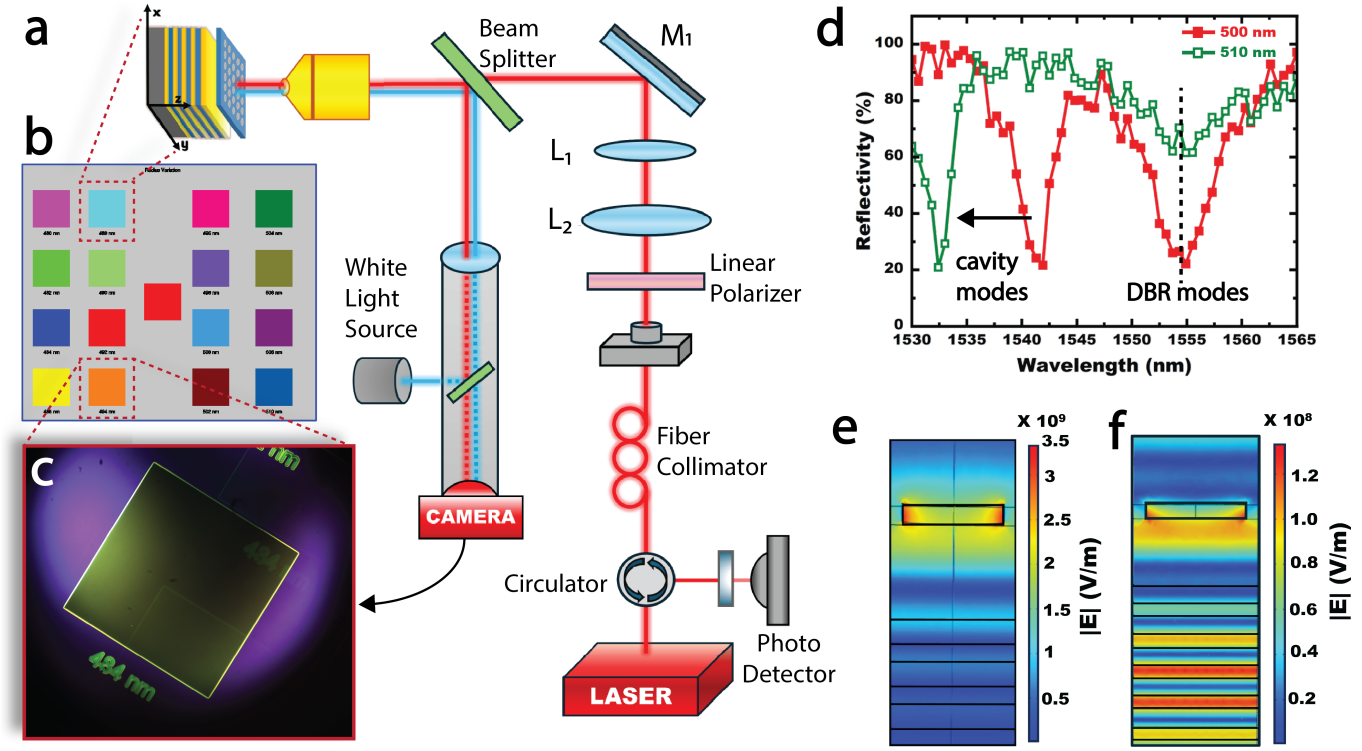

图4. 采用宽带反射率测量对集成式氮化硅$_3N_4$–分布式布拉格反射器腔进行光学表征。(a) 用于腔测量的微反射率装置示意图，结合了用于反射率光谱学的可调谐红外激光器和用于对准的白光相机光路。(b) 制备芯片的布局图，展示了由十六个 1×1 mm^2 悬空铂碳膜组成的阵列，孔半径经光刻调控，另有一个中央仅含 DBR 的参考区域。(c) 对准时使用的相机图像，展示了白光照明下的悬空氮化硅$_3N_4$ 膜，红外探测光斑位于其中心。(d) 两种膜设计（孔半径分别为 500 nm 和 510 nm）的实测反射率光谱。腔模随半径变化而移动，而 DBR 相关模式保持不变。(e) 空气间隙中形成的垂直受限腔模的模拟电场分布。(f) DBR 相关光子带边模式的模拟电场分布，该模式主要受限于图案化膜内。

能够用于最先进的光机械工程几何结构。

为评估这一点，我们在高真空（$\approx 10^{-6}$ mbar）下使用激光多普勒测振（LDV）对 DBR 集成膜进行了表征。图 5a 显示了测得的基膜模态面外速度场，呈现出预期的对称位移分布。宽带扫描（图 5b）识别出约 259 kHz 的基模共振，以及延伸至 1 MHz 的若干高阶模式。随后，我们分离出基模峰值，并在突然关闭压电驱动后测量其衰减。振铃衰减曲线（图 5c）得出机械品质因数$Q_{\mathrm{mech}} = 3.0 \times 10^5$，表明本征阻尼较低且应力稀释显著。

由于此处使用的薄膜厚度为 200 nm（即为确保较高的光学反射率而选定），这些Q_{mech} 数值自然低于超薄（20 nm）Si_3N_4 薄膜所能达到的数值。铂碳反射率需要较厚反射镜，但采用不同厚度的设计可以将这些要求分开满足（例如，较厚的镜区搭配薄型应力稀释夹持结构） [4, 12]。因此，不仅要测量这块简单方形薄膜的 Q_{mech}，还要确认该简单方形薄膜的 Q_{mech} 是否得以保留，并验证 DBR集成不会引入额外损耗。如果在这种几何结构中能够保持 Q_{mech}，该平台便可支持一整系列高-Q_{mech}、声子工程化、软夹持或系留设计，这些设计已知能够达到 10^8–10^{10}。

为评估 DBR 集成对机械性能的影响，我们首先确定了 DBR 集成芯片上最高的Q_{mech} 器件，其孔半径为 484 nm。随后，我们在未集成 DBR 的情况下制作了标称相同的芯片版图，并直接比较了相同的薄膜设计（图 4b）。DBR 集成薄膜的基频为 259 kHz，且 $Q_{mech} = 3.0 \times 10^5$；而硅衬底上未集成 DBR 的对应薄膜基频略高，为 290 kHz，且 $Q_{mech} = 3.8 \times 10^5$。这一频移与薄膜厚度及 DBR 结构相关热膨胀应力的微小变化一致。在测量的器件组中，PhC+DBR 器件的平均机械品质因数为$\langle Q_{mech} \rangle = 1.3 \times 10^5$，而仅含 PhC 的器件为$\langle Q_{mech} \rangle = 4.6 \times 10^5$，表明集成结构的机械相干性仍处于相同数量级。关键的是，

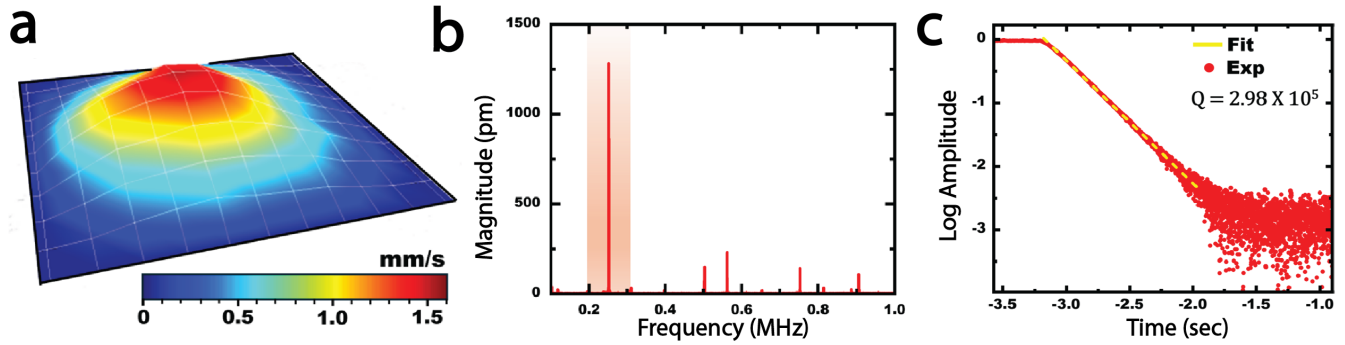

图 5. 与 DBR 平台集成的悬空 Si_3N_4 薄膜的机械表征。(a) 使用激光多普勒测振仪测得的基膜模态面外速度图。(b) 显示基模共振和高阶模式的频域谱。(c) 基模的机械振铃测量，使用指数拟合（黄色）提取 Q_{mecho}。

集成 DBR 后， Q_{mech} 未出现灾难性劣化。与软夹持模式不同，方形薄膜的基频模式与衬底强烈耦合，因此芯片损耗通道最大，是评估 DBR 叠层引入额外耗散的严格参照。 [53]

这些测量表明，Si_3N_4/SiO_2DBR 几乎不会引入额外的机械损耗。即使在多层镜面衬底上，SF_6 释放工艺仍能保持薄膜的耗散特性，证实其与高应力 Si_3N_4完全兼容。这表明该平台是一种对机械性能影响极小的集成方案，能够支持本领域开发的最高 Q 值几何结构，同时实现紧凑、高精细度的光学腔。

VI. 结论与展望

我们提出了一种可扩展、兼容 CMOS 的制造策略，利用晶圆级光刻定义工艺，将高应力 Si_3N_4 薄膜与宽带分布式布拉格反射器（DBR）单片集成。该平台通过省去键合、穿晶圆刻蚀和精密对准，消除了腔光力学领域长期存在的瓶颈。取而代之的是，采用无粘连气相欠刻工艺定义垂直自对准腔，并实现均匀的亚微米薄膜–DBR间距。垂直光力耦合尤其适用于 Si_3N_4, ，因为其最高-Q_{mech} 谐振器利用由超薄膜厚度（≈20 nm）定义的面外弯曲模式；这类厚度可通过沉积轻松实现，却极难通过横向纳米光刻 [51]实现。

一项核心材料进展是采用交替的低压化学气相沉积 Si_3N_4 与SiO_2 层，以形成耐热DBR。尽管其折射率反差低于Ta_2O_5/SiO_2 叠层，但低压化学气相沉积工艺带来极低的光吸收，并保持在化学计量比高应力Si_3N_4 沉积所需的800–900 °C下稳定。由此，较低的折射率反差被低光学损耗所抵消，从而实现与更高反差的III–V 体系 [48]中所展示的相当的精细度。

光学与机械表征证实，集成并未影响氮化硅$_3N_4$ 平台的关键性能。机械振铃测量显示 $Q_{\mathrm{mech}} > 10^5$，与未集成的薄膜相当；反射率光谱则显示，腔精细度超过 800，且具有适用于精密光学读出的强共振。尽管我们的演示采用了相对较厚（200 nm）的方形薄膜，而非针对创纪录 Q_{mech}优化的几何结构，但与不含分布式布拉格反射器的相同器件相比，分布式布拉格反射器工艺引入的机械损耗很小。

该制备路线与腔光力学中广泛使用的氮化硅$_3N_4$ 谐振器生态系统兼容，包括反射式声子薄膜 [42]，蹦床谐振器 [12]，层级超材料，以及高纵横比谐振器 [50]。它也非常适合厚衬底实现；众所周知，对于没有软钳位的模式，这类实现有助于提升 Q_{mech} [12, 53, 54]，，因为 SF_6 气相释放可在数秒内将薄膜悬置于毫米级衬底上，同时避免湿法刻蚀经厚芯片进行刻蚀通道时伴随的粘附、翘曲和低良率问题 [32]。因此，先前通过局部加厚反射镜区域、同时将钳位区减薄至数十纳米的策略 [4, 12] ，自然也可扩展至这一平台。

更广泛而言，该平台与高应力Si_3N_4所实现的超高纵横比几何结构兼容。近期工作表明，具有纳米厚度、含数十亿个孔的厘米级光子晶体反射器能够以优异的平整度制备 [50]；在这些尺度下，更大的光束直径即使对于更薄的薄膜也能维持高反射率 [55]。尽管我们在此演示的是平-平腔，但孔几何结构沿径向变化的光子晶体结构也可以赋予有效的曲

率 [56, 57], , 从而为横模工程、降低对横向失准的敏感性以及更低的截断损耗提供未来机遇。

总而言之，这一单体平台将精细且受限于对准的腔光机械架构，转变为稳健且适于制造的架构。它在保留高应力 Si_3N_4 优异光学性能和机械性能的同时，以简单的自对准工艺取代复杂的组装，为实现可扩展的精密传感、集成光子学和新一代量子技术提供了切实可行的途径。

VII. 方法

分布式布拉格反射器多层结构通过交替沉积低压化学气相沉积（LPCVD）SiO_2 和低应力氮化硅层制成。氧化物薄膜在卧式热壁低压化学气相沉积炉中沉积，温度为700 ℃，压力为 150 mTorr，使用汽化的正硅酸四乙酯（TEOS）作为前驱体。低应力氮化硅层在类似的炉中沉积，通入 NH_3 和二氯硅烷（DCS）的混合气体，NH_3/DCS 流量比固定为 0.19，对应富硅状态。氮化物沉积在 860 ℃、150 mTorr 条件下进行。

与等离子体增强化学气相沉积（PECVD）相比，氮化物沉积更倾向于采用低压化学气相沉积（LPCVD），因为后者的氢掺入可忽略不计。由此产生的低氢含量赋予薄膜优异的热稳定性，可防止在后续沉积步骤中出现显著的应力变化以及开裂或分层。

完成DBR叠层后，在低压化学气相沉积反应器中通入SiH_4 ，于 560 ℃沉积了厚度为 1 μm的非晶硅层。随后，在用于沉积DBR氮化物层的同一炉体中沉积最上层高应力氮化硅层，但采用了高得多的NH_3/DCS流量比，对应于化学计量条件。在这种情况下，沉积温度和压力分别设为 700 ℃和150 mTorr。

致谢

我们感谢Mohammadjavad Ebrahimipour和Juan Lizarraga Lallana在实验方面提供的帮助，并感谢Gerard Verbiest、Peter Steeneken、Andrea Cupertino和Dalziel Wilson提出的宝贵意见。本研究获得了由参与国共同资助的EMPIR计划以及欧洲联盟地平线2020研究与创新计划（编号17FUN05 PhotoQuant）的资助。本出版物是研究计划NWO启动计划中“利用微芯片卡西米尔实验探究奇异超导体物理”（740.018.020）项目的一部分，该计划部分由荷兰研究理事会（NWO）资助。由欧洲联盟资助/共同资助（欧洲研究理事会，EARS，101042855）。所表达的观点和意见仅代表作者本人，不一定反映欧洲联盟或欧洲研究理事会的观点。欧洲联盟和资助机构均不对此承担责任。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据可用性声明

支持本研究结论的数据可向通讯作者合理索取。

[1] M. Aspelmeyer、T. J. Kippenberg 和 F. Marquardt，腔光力学，《现代物理评论》**86**，1391（2014）。[2] B.-B. Li、L. Ou、Y. Lei 和 Y.-C. Liu，腔光力学传感，《纳米光子学》**10**，2799（2021）。[3] M. Rossi、D. Mason、J. Chen、Y. Tsaturyan 和 A. Schliesser，基于测量的机械运动量子控制，《自然》**563**，53（2018）。[4] G. Huang、A. Beccari、N. J. Engelsen 和 T. J. Kippenberg，利用超低噪声腔实现室温量子光力学，《自然》**626**，512（2024）。[5] C. Reinhardt、T. M¨uller、A. Bourassa 和 J. C. Sankey，用于传感和光力学的超低噪声氮化硅蹦床谐振器，《物理评论X》**6**，021001（2016）。[6] B. P. Abbott、R. Abbott、T. D. Abbott、M. R. Abernathy、F. Acernese、K. Ackley、C. Adams、T. Adams、P. Addesso、R. X. Adhikari、 *et al.*，引力波的观测——自双黑洞并合产生的引力波，《物理评论快报》**116**，061102 (2016). [7] N. J. Engelsen, A. Beccari, and T. J. Kippenberg，采用耗散稀释的超高品质因数微纳机械谐振器，《自然·纳米技术》**19**, 725 (2024). [8] M. Xu, D. Shin, P. M. Sberna, R. van der Kolk, A. Cupertino, M. A. Bessa, and R. A. Norte，用于纳米力学的高强度非晶碳化硅，《先进材料》**36**, 2306513 (2024). [9] A. T. Land, M. Dey Chowdhury, A. R. Agrawal, and D. J. Wilson，氮化硅的亚ppm纳米机械吸收光谱，《纳米快报》**24**, 7578 (2024). [10] J. Thompson, B. Zwickl, A. Jayich, F. Marquardt, S. Girvin, and J. Harris, 高精细度腔与微机械薄膜的强色散耦合，《纳——

然》**452**, 72 (2008). [11] Y. Tsaturyan, A. Barg, E. S. Polzik, and A. Schliesser，通过软夹持和耗散稀释实现超高相干纳米机械谐振器，《自然·纳米技术》**12**, 776 2017( ). [12] R. A. Norte, J. P. Moura, and S. Gr¨oblacher，室温量子光力学实验用机械谐振器，《物理评论快报》**116**, 147202 (2016). [13] A. H. Ghadimi, S. A. Fedorov, N. J. Engelsen, M. J. Bereyhi, R. Schilling, D. J. Wilson, and T. J. Kippenberg，超低机械耗散的弹性应变工程，《科学》**360**, 764 (2018). [14] D. Shin, A. Cupertino, M. H. de Jong, P. G. Steeneken, M. A. Bessa, and R. A. Norte，通过贝叶斯优化设计蛛网式纳米机械谐振器：受自然启发并由机器学习引导，《先进材料》**34**, 2106248 2022( ). [15] M. J. Bereyhi, A. Arabmoheghi, A. Beccari, S. A. Fedorov, G. Huang, T. J. Kippenberg, and N. J. Engelsen，纳米机械谐振器的周边模式在室温下品质因数超过10 9，《物理评论X》**12**, 021036 (2022). [16] D. J. Wilson, C. A. Regal, S. B. Papp, and H. J. Kimble，采用化学计量比氮化硅薄膜的腔光力学，《物理评论快报》**103**, 207204 (2009). [17] A. Cupertino, D. Shin, L. Guo, P. G. Steeneken, M. A. Bessa, and R. A. Norte，低耗散的厘米级纳米机械谐振器，Nature Communications **15**, 4255 (2024). [18] A. G. Krause, M. Winger, T. D. Blasius, Q. Lin, and O. Painter，高分辨率微芯片光机械加速度计，《自然·光子学》**6**, 768 (2012). [19] M. H. De Jong, A. Ganesan, A. Cupertino, S. Gr¨oblacher, and R. A. Norte，机械泛音频率梳，Nature Communications **14**, 1458 (2023). [20] D. Mason, J. Chen, M. Rossi, Y. Tsaturyan, and A. Schliesser，低于标准量子极限的连续力和位移测量，《自然·物理》**15**, 745 (2019). [21] S. S. Verbridge, J. M. Parpia, R. B. Reichenbach, L. M. Bellan, and H. G. Craighead，高拉伸应力纳米弦在室温下实现高品质因数共振，《应用物理学杂志》**99** (2006). [22] P. Sadeghi, M. Tanzer, S. L. Christensen, and S. Schmid，夹持区加宽对纳米机械氮化硅谐振器品质因数的影响，《应用物理学杂志》**126** (2019). [23] S. Schmid, K. Jensen, K. Nielsen, and A. Boisen，高Q值微纳机械弦谐振器中的阻尼机制，《物理评论B：凝聚态物质与材料物理》**84**, 165307 (2011). [24] D. Hoch, X. Yao, and M. Poot，预偏移氮化硅谐振器中的应力几何调谐，《纳米快报》**22**, 4013 (2022). [25] Z. Li, M. Xu, R. A. Norte, A. M. Arag´on, P. G. Steeneken, and F. Alijani，非线性纳米谐振器从硬化到软化的应变工程，Communications Physics**7**, 53 (2024). [26] M. J. Bereyhi, A. Beccari, R. Groth, S. A. Fedorov, A. Arabmoheghi, T. J. Kippenberg, and N. J. Engelsen，具有超低机械耗散的层级拉伸结构，Nature Communications **13**, 3097 (2022). [27] E. Serra, B. Morana, A. Borrielli, F. Marin, G. Pandraud, A. Pontin, G. A. Prodi, P. M. Sarro, and M. Bonaldi，硅——

用于室温量子腔光力学的氮化硅微机械振荡器，《微机电系统期刊》27，1193（2018）。[28] L. G. Villanueva 和 S. Schmid，《物理评论快报》113，227201（2014）：表面损耗是硅微米和纳米机械谐振器中普遍存在的限制性阻尼机制的证据。[29] S. Chakram、Y. S. Patil、L. Chang 和 M. Vengalattore，《物理评论快报》112，127201（2014）：超高品质因数氮化硅薄膜谐振器中的耗散。[30] P.-L. Yu、K. Cicak、N. Kampel、Y. Tsaturyan、T. Purdy、R. Simmonds 和 C. Regal，《应用物理快报》104（2014）：用于膜微谐振器的声子带隙屏蔽结构。[31] C. Reetz、R. Fischer、G. G. Assumpcao、D. P. McNally、P. S. Burns、J. C. Sankey 和 C. A. Regal，《物理评论应用》12，044027（2019）：具有宽带隙和低质量缺陷的薄膜声子晶体分析。[32] R. A. Norte，*Nanofabrication for on-chip optical levitation atom-trapping and superconducting quantum circuits*，2015（加州理工学院，）。[33] D. Høj、F. Wang、W. Gao、U. B. Hoff、O. Sigmund 和 U. L. Andersen，《自然通讯》12，5766（2021）：基于逆向设计的超相干纳米机械谐振器。[34] M. Yuan、M. A. Cohen 和 G. A. Steele，《应用物理快报》107（2015）：毫开尔文温度下品质因数超过 10^8 的氮化硅膜谐振器。[35] T. Purdy、R. Peterson、P. Yu 和 C. Regal，《新物理学期刊》14，115021（2012）：低温下氮化硅薄膜的腔光力学。[36] W.-H. Chuang、T. Luger、R. K. Fettig 和 R. Ghodssi，《微机电系统期刊》13，870（2004）：低温下低压化学气相沉积氮化硅薄膜的机械性能表征。[37] Y. Seis、T. Capelle、E. Langman、S. Saarinen、E. Planz 和 A. Schliesser，《自然通讯》13，1507（2022）：超相干机电系统的基态冷却。[38] R. Fischer、N. Kampel、G. Assump˛c˜ao、P.-L. Yu、K. Ci-cak、R. Peterson、R. Simmonds 和 C. Regal，arXiv 预印本 arXiv:1611.00878（2016）：在 100 mK 以下光学探测氮化硅薄膜的机械损耗。[39] F. Zhou、Y. Bao、J. J. Gorman 和 J. R. Lawall，《激光与光子学评论》17，2300008（2023）：利用超高反射率光子晶体薄膜实现腔光力学双稳态。[40] F. Zhou、Y. Bao、J. Gorman 和 J. R. Lawall，《APL光子学》9（2024）：具有最优几何结构的超高反射率光子晶体薄膜。[41] M. H. de Jong、J. Li、C. G¨artner、R. A. Norte 和 S. Gr¨oblacher，《Optica》9，170（2022）：光力学阵列中的相干机械噪声抵消与协同率竞争。[42] G. Enzian、Z. Wang、A. Simonsen、J. Mathiassen、T. Vi-bel、Y. Tsaturyan、A. Tagantsev、A. Schliesser 和 E. S. Polzik，《Optics Express》31，13040（2023）：用于腔量子光力学的声子屏蔽光子晶体反射镜薄膜。[43] X. Chen、C. Chardin、K. Makles、C. Ca¨er、S. Chua、R. Braive、I. Robert-Philip、T. Briant、P.-F. Cohadon、A. Heidmann、*et al.*，高精细度法布里-珀罗腔

采用二维氮化硅光子晶体薄板，《Light: Science & Applications》**6**，e16190（2017）。[44] V. Dumont、S. Bernard、C. Reinhardt、A. Kato、M. Ruf 和 J. C. Sankey，《Optics Express》**27**，25731（2019）：弯曲调谐的边缘膜光机械系统。[45] C. H. Bui、J. Zheng、S. Hoch、L. Y. Lee、J. Harris 和 C. Wei Wong，《Applied Physics Letters》**100**（2012）：利用导模共振实现高反射率、高Q值微机械薄膜，以增强光机械耦合。[46] T. Mitra、G. Singh、A. A. Darki、S. P. Madsen 和 A. Dantan，《Optics Express》**32**，15667（2024）：采用谐振亚波长光栅反射镜的窄线宽法诺微腔。[47] A. D. Hyatt、O. A. Flores、A. R. Agrawal、C. A. Condos 和 D. J. Wilson，《Journal of Visualized Experiments》（JoVE），e68706（2025）：高Q值氮化硅膜谐振器的制造与表征。[48] S. Kini Manjeshwar、A. Ciers、J. Monsel、H. Pfeifer、C. Peralle、S. M. Wang、P. Tassin 和 W. Wieczorek，《Optics Express》**31**，30212（2023）：在分布式布拉格反射器上方集成悬空光子晶体反射镜的微腔光力学。[49] G. J. Hornig、S. Al-Sumaidae、J. Maldaner、L. Bu 和 R. DeCorby，《Optics Express》**28**，28113（2020）：单片集成的中间膜腔光力学系统。[50] L. Norder、S. Yin、M. H. de Jong、F. Stallone、H. Aydog-mus、P. M. Sberna、M. A. Bessa 和 R. A. Norte，Pentagonal 光子晶体反射镜：通过神经拓扑优化实现加速度增强的可扩展光帆，Nature Communications **16**, 2753（2025）。[51] J. Guo、R. Norte 和 S. Gr¨oblacher，反馈冷却室温机械振荡器，使其接近运动基态，Physical review letters **123**, 223602（2019）。[52] M. Xu、R. J. Elbertse、A. Ke̦skekler、G. Bimonte、J. Lee、S. Otte 和 R. A. Norte，测量超导转变过程中的卡西米尔力，arXiv 预印本 arXiv:2504.10579（2025）。[53] M. H. de Jong、M. A. ten Wolde、A. Cupertino、S. Gr¨oblacher、P. G. Steeneken 和 R. A. Norte，氮化硅谐振器中由衬底 - 模态耦合引起的机械耗散，Applied Physics Letters**121**（2022）。[54] D. J. Wilson，*Cavity optomechanics with high-stress silicon nitride films*（加州理工学院，2012）。[55] J. P. Moura、R. A. Norte、J. Guo、C. Sch¨afermeier 和 S. Gr¨oblacher，厘米尺度悬空光子晶体反射镜，Optics express **26**, 1895（2018）。[56] A. Agrawal、J. Manley、D. Allepuz-Requena 和 D. Wil-son，用于集成腔光力学的聚焦膜超反射镜，Optica **11**, 1235（2024）。[57] J. Guo、R. A. Norte 和 S. Gr¨oblacher，利用聚焦光子晶体阵列实现集成光学力传感器，Optics express **25**, 9196（2017）。